

УДК 551.515.3

ВОДЯНЫЕ СМЕРЧИ В РОССИИ И В МИРЕ: КЛИМАТОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

© 2023 г. О. В. Калмыкова*

ФГБУ “Научно-производственное объединение “Тайфун”, ул. Победы, 4, Обнинск, 249038 Россия

*e-mail: kov@feerc.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Представлен обзор изученности водяных смерчей в мире. Приведены наиболее известные схематические модели образования водяных смерчей. Выделены основные факторы смерчегенеза над водной поверхностью. Собраны и проанализированы данные о случаях регистрации водяных смерчей на земном шаре за период с 2000 по 2022 гг. Выделены три основных района их сосредоточения: Средиземное море, Мексиканский залив и прилегающая Атлантика, Великие американские озера. Оценена повторяемость водяных смерчей в странах с наибольшим числом случаев их ежегодной регистрации (США, Италия, Греция, Россия, Турция). Обобщены известные данные о характеристиках смерчей, полученные в ходе прямых и дистанционных измерений. Дана концептуальная схема их строения. Проанализированы водяные смерчи в России. Представлена статистика случаев их регистрации у Черноморского побережья России. Построена карта мест выхода черноморских смерчей на побережье.

Ключевые слова: водяные смерчи, факторы смерчегенеза, структура вихря, характеристики смерчей, районы активного смерчеобразования, черноморские смерчи, статистика

DOI: 10.31857/S0002351523040107, **EDN:** YOBSZW

ВВЕДЕНИЕ

Водяные смерчи (waterspouts) — интенсивные воронкообразные вихри с почти вертикальной осью вращения, возникающие над водной поверхностью. Водяные смерчи относятся к классу конвективных вихрей с теплым ядром и пониженным давлением в центре [Renno and Bluestein, 2001]. По своим термодинамическим характеристикам они схожи как с пыльными вихрями (радиус вращения около 1 м), так и с торнадо (интенсивными смерчами над сушей) и ураганами.

Водяные смерчи, как правило, рассматривают в контексте вихрей немезоциклонного происхождения вместе со слабыми вихрями над сушей (landspouts) [Markowski and Richardson, 2010]. По мнению многих специалистов, процессы образования вихрей этих двух видов практически идентичны, их отличает лишь поверхность, над которой они формируются [Brady and Szoke, 1989; Types of tornado, электронный ресурс]. Известны случаи возникновения водяных смерчей и из су-

перячек [Chan et al., 2021; Glanville et al., 2016; Mihajlovic et al., 2021]. Подобные смерчи по аналогии со смерчами над сушей выделяют в отдельную категорию — мезоциклонные водяные смерчи [Meaden, 1985; Smith, электронный ресурс].

НЕМЕЗОЦИКЛОННЫЕ ВОДЯНЫЕ СМЕРЧИ

Немезоциклонные или, как их условно можно назвать, классические водяные смерчи возникают из облаков хорошей погоды (fair-weather waterspouts), а также из отдельных кучево-дождевых облаков или их скоплений, дающих осадки, иногда являющихся и грозовыми (thunderstorm waterspouts) [Renko et al., 2016; Spratt, 1994]. Смерчи данного типа, как правило, не отличаются высокой интенсивностью, по шкале Фудзиты это смерчи класса F0 или F1, со скоростями ветра от 18 до 50 м/с. Более точные оценки скоростей будут даны ниже в разделе, посвященном характеристикам смерчей. Время их существования также невелико — не более 20 мин [Golden, 2015]. Такие смерчи обычно малоподвижны. Они могут представлять опасность для малогабаритных судов, путь следования которых протекает в непосредственной близости от смерча. В случае выхода подобных смерчей на сушу, они, как правило,

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

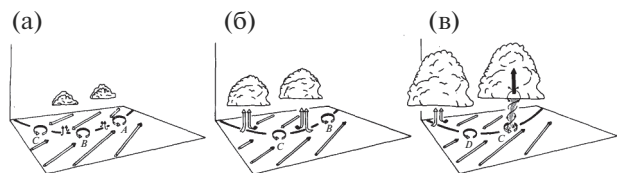


Рис. 1. Схематическая модель зарождения немезоциклонного смерча [Wakimoto and Wilson, 1989].

сразу же распадаются, оставляя после себя лишь кратковременное усиление ветра, которое, тем не менее, может нанести ущерб различного рода.

Возникновению водяных смерчей немезоциклонного типа способствует наличие следующих благоприятных факторов: сосредоточение в приземном слое вертикальной завихренности, мощная конвекция и высокая влажность в нижнем слое атмосферы [Miglietta, 2019]. Начальная завихренность в таких смерчах, как правило, является следствием действия источников локального масштаба, что обуславливает возможность формирования вихрей как циклонического, так и антициклонического направления вращения [Renno and Bluestein, 2001]. Локальная завихренность может возникать вдоль осей горизонтального сдвига ветра, к примеру, в местах соприкосновения ветра, дующего с моря, с ветровым потоком, идущим с суши [Miglietta, 2019], вдоль границ оттока воздуха, когда нисходящие из облака потоки сталкиваются с фоновым потоком или с потоками из других облаков — наиболее частый сценарий образования водяных смерчей в открытых водах Атлантики [Simpson et al., 1986], и, наконец, вследствие географических особенностей местности — неоднородность трения, тепловые контрасты, пространственно-неоднородное ветровое воздействие, бризовая циркуляция [Dotzek et al., 2010].

На рис. 1 показана схема зарождения немезоциклонного смерча, предложенная в работе [Wakimoto and Wilson, 1989]. На начальном этапе в приземном слое образуются микровихри А, В, С (рис. 1а). Если атмосфера в этом месте неустойчива, начинают формироваться кучевые облака. По мере их роста усиливается мощность восходящих потоков (рис. 1б). Как только один из микровихрей попадает в область влияния восходящего потока, начинает зарождаться вихрь — восходящий поток способствует вытягиванию завихренности к основанию облака (рис. 1в). Вихрь не сразу становится видимым. Когда он достигает основания, активизируется процесс конденсации водяного пара. Образовавшийся конденсат начинает постепенно опускаться по краям внутренней полости вихря. Формируется видимая воронка. При наличии достаточно сильного вращения у поверхности воды все больше ее капель вовлека-

ются в вихревое движение. По некоторым оценкам минимальная скорость вращения для отрыва частиц воды от поверхности должна быть больше 22.5 м/с [Golden, 1974b]. Нередко вдоль достаточно протяженной линии сдвига формируется целое семейство водяных смерчей.

Образование устойчивой вихревой структуры возможно лишь при небольшом сдвиге ветра [Dotzek et al., 2010]. Резкие изменения скорости и направления ветра с высотой могут способствовать быстрому распаду вихря. При выпадении осадков из материнского облака смерча его ось вращения начинает отклоняться в сторону от источника подавления восходящих потоков. Спустя какое-то время начнет исчезать воронка вихря. Со стороны наблюдателя будет казаться, что она отрывается от поверхности воды и поднимается к облаку.

В работе [Golden, 1974a] предложена концептуальная модель образования водяных смерчей, в соответствии с которой для смерчегенеза существен перенос энергии и углового момента по спектру возмущений различных масштабов — от масштаба воронки (3–150 м) до синоптического масштаба. При этом порядок очередности переноса (от большего масштаба к меньшему) не обязательно способствует снижению интенсивности данного переноса. Возникновение локальной завихренности в водяных смерчах может обуславливаться влиянием небольших возмущений синоптического масштаба, которые приводят к образованию слабой конвергенции и положительной завихренности, а также способствуют ее распространению в пространстве. Кроме того важную роль может сыграть и изначально вращение в материнских облаках смерчей.

В работе [Renno and Bluestein, 2001] рассматривается простейшая термодинамическая модель водяного смерча, описывающая условия поддержания вихревой структуры как тепловой машины — частицы воздуха, движущиеся по спирали по направлению к смерчу, поглощают тепло от поверхности воды и становятся более теплыми и увлажненными, чем окружающий их воздух. Поскольку горизонтальные размеры водяных смерчей крайне малы, как правило, для них не требуется учет силы Кориолиса. Считается, что в водяном смерче приблизительно выполняется условие циклострофического баланса — баланса силы градиента давления и центробежной силы [Golden, 1974b]. Модель базируется на предположении о том, что вся полезная работа тепловой машины идет на преодоление механического трения. Модель объясняет воронкообразную форму вихря следующим образом: поскольку наиболее сильное трение отмечается вблизи поверхности воды, то за счет уменьшения углового момента радиус вращения в этой части вихря будет наименьшим. Кроме то-

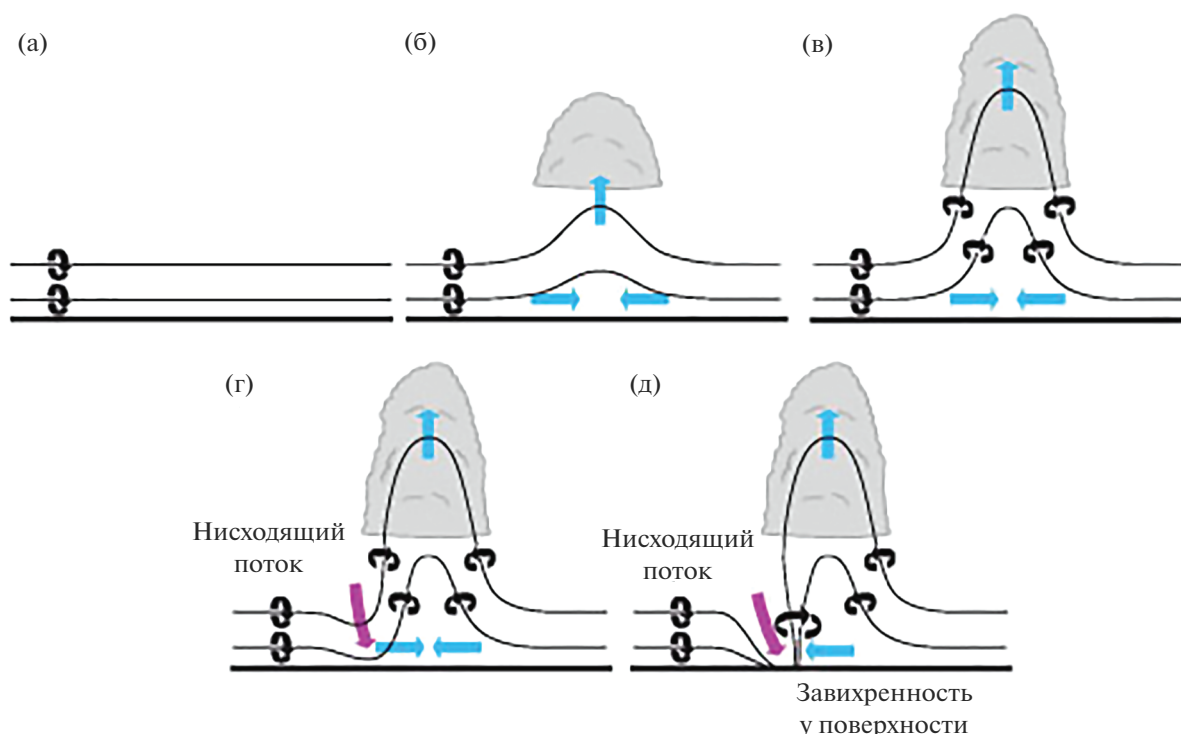


Рис. 2. Схематическая модель зарождения мезоциклонного смерча [Markowski and Richardson, 2010].

го модель констатирует важное условие возникновения водяных смерчей — наличие ненулевой завихренности фонового потока вне зависимости от источника начальной завихренности в приводном слое. Этот факт согласуется с вышеупомянутой концепцией переноса энергии и углового момента различных масштабов. Модель также объясняет, почему смерчи чаще всего формируются в регионах с достаточно теплой и влажной воздушной массой, а также на границах теплых и холодных вод. В таких условиях достигается наиболее быстрое поступление тепла в тепловую машину.

МЕЗОЦИКЛОННЫЕ ВОДЯНЫЕ СМЕРЧИ

О мезоциклонных водяных смерчах (tornado/supercell waterspouts) пока известно крайне мало. В работе [Glanville et al., 2016] высказано предположение о том, что поскольку теплый влажный воздух над морской поверхностью обладает большей степенью неустойчивости, нежели воздух над сушей, именно над водой следует ожидать более частого возникновения суперячеек со смерчами. В последнее время фиксируется появление мезоциклонных водяных смерчей там, где ранее они никогда не регистрировались [Chan et al., 2021; Mihajlovic et al., 2021]. В работе [Mihajlovic et al., 2021] подчеркивается, что изменение климата вполне вероятно может привести к увеличению повторяемости водяных смерчей высокой интенсивности.

Смерчи мезоциклонного типа возникают из достаточно мощных кучево-дождевых облаков с вращением в центре. Эти долгоживущие образования (суперячейки), помимо смерчей, как правило, генерируют и другие опасные явления, такие как град, шквалы, сильные ливни, интенсивные грозы. Обычно мезоциклонные водяные смерчи есть не что иное, как вышедшие на воду смерчи, изначально формирующиеся из суперячеек над сушей [Smith, электронный ресурс]. Однако, как было упомянуто выше, они могут зарождаться и непосредственно над водной поверхностью. Мезоциклонные водяные смерчи могут вбирать в себя большие массы воды и впоследствии обрушивать их на сушу, вызывая катастрофические последствия [Шнюков и др., 1994]. К счастью, смерчи данного типа регистрируют не так часто, более распространены на земном шаре классические водяные смерчи [Smith, электронный ресурс].

На рис. 2 показана схема смерчегенеза мезоциклонного типа [Markowski and Richardson, 2010]. Образованию суперячейки способствует наличие струйного течения нижнего уровня, сильный вертикальный сдвиг ветра, высокая влажность и неустойчивость нижнего слоя атмосферы. Сдвиг ветра приводит к закрутке струй и формированию горизонтальной завихренности (рис. 2а). Попадая в область вертикальных движений под растущим облаком, вращающийся поток постепенно вовлекается в подъем, ось его вращения отклоня-

ется (рис. 2б). Со временем изначально горизонтальная завихренность трансформируется в вертикальную (рис. 2в). Вращающийся воздух, достигая нижней границы облака, устремляется вверх и пробивает наковальню (верхнюю часть облака). У облака появляется возвышающаяся макушка (купол) — один из характерных признаков суперячейки. В облаке на высоте концентрируется источник вертикальной завихренности — мезоциклон. Нисходящими потоками из облака осуществляется перенос завихренности к поверхности земли/воды (рис. 2г). При столкновении вращающихся масс воздуха с неподвижным воздухом у поверхности возникает сильный радиальный поток к центру вращения. Скорость вращения движущихся частиц воздуха увеличивается (за счет уменьшения радиуса вращения). Нарушается циклострофический баланс и вблизи поверхности генерируется стремительный восходящий поток, дающий начало смерчу (рис. 2д).

КЛИМАТОЛОГИЯ ВОДЯНЫХ СМЕРЧЕЙ

Водяные смерчи регистрируют по визуальным наблюдениям. Как следствие, известные данные об их распределении по земному шару могут быть не достаточно полными — возможна недооценка количества смерчей в малонаселенных и труднодоступных местах, а также вследствие индивидуальных особенностей очевидцев (не считают нужными регистрировать эти явления, нет возможности их учета). Зависимость статистики смерчей от плотности населения пока остается нерешенной проблемой. Что касается индивидуальных особенностей, то в настоящее время в этом отношении отмечаются существенные изменения в лучшую сторону. В последние годы все больше людей проявляют интерес к фиксации опасных явлений. Отчасти это обусловлено появлением портативных средств связи и мобильного Интернета, которые значительно упростили процесс регистрации этих явлений. Принимая во внимание указанную тенденцию, по всей видимости, наиболее реальными и приближенными к действительности данными о водяных смерчах следует считать данные, полученные за последние несколько лет. Также представляет интерес и анализ динамики частоты появления водяных смерчей и за более длительный период времени в странах ведущих целенаправленный и строгий учет случаев их появления.

В 2008 г. группой ученых из различных стран был создан Международный центр исследований водяных смерчей (International Centre for Waterspout Research — ICWR) [Sioutas et al., 2009]. С 2020 г. на сайте этого центра www.icwr.ca в открытом доступе публикуются данные о водяных смерчах по всему земному шару. Полная статистика случаев их регистрации за год доступна, на-

чина с 2021 г. По данным ICWR была построена карта мест появления водяных смерчей в 2021–2022 гг. (рис. 3). Самый северный водяной смерч за рассматриваемый период был зарегистрирован 22 июля 2022 г. у побережья Швеции на 65.6° с.ш., самый южный — 20 мая 2022 г. вблизи Новой Зеландии на 42.7° ю.ш. Основная масса смерчей была зафиксирована в Северной Америке и в Европе, включая Европейскую территорию России (рис. 3). На оставшуюся часть Земли пришлось всего около 12% от общего числа смерчей, отмечавшихся в этот период.

Водяные смерчи, как известно, чаще всего возникают в регионах с достаточно теплыми водами и высокой температурой воздуха, т.е. там, где есть все условия для частого развития конвекции. Годовой ход смерчей для большинства акваторий хорошо согласуется с годовым распределением среднемесячной температуры воды [Golden, 2015]. Пик частоты образования смерчей часто совпадает с пиком максимального прогрева воды.

Крайне редко водяные смерчи регистрируют вдоль восточных побережий Северной и Южной Америки, а также Африки, где преобладает холодный апвеллинг [Golden, 2015]. Данное утверждение достаточно хорошо согласуется с полученным распределением водяных смерчей на Земле в 2021–2022 гг.

Детальный анализ построенной карты водяных смерчей (рис. 3) позволил выделить три основных района их сосредоточения на нашей планете. Ниже дано краткое описание каждого района в порядке уменьшения числа зарегистрированных в 2021–2022 гг. смерчей.

Первый район — прибрежные воды теплых морей Южной Европы, входящих в состав Средиземного моря (548 смерчей, рис. 4). В этом районе выделяется небольшой участок северного побережья Лигурского моря от центральной Лигурии до северной Тосканы с достаточно высокой плотностью водяных смерчей — в год на каждые 10000 км^2 площади приходится около 4 смерчей [Miglietta and Matsangouras, 2018].

Второй район — прибрежные воды Мексиканского залива и Атлантики вдоль Южных штатов Америки (Луизиана, Миссисипи, Флорида, Джорджия, Северная и Южная Каролина, Виргиния) (456 смерчей, рис. 5). В этом районе расположен архипелаг Флорида-Кис, где отмечается наибольшая плотность водяных смерчей на нашей планете — ежегодно на площади в 22809 км^2 регистрируют от 50 до 500 случаев их возникновения [Golden, 1974b].

Третий район — внутренние воды Великих американских озер (197 смерчей, рис. 5). В 2020 г. в этом районе была зафиксирована самая масштабная вспышка водяных смерчей в мире — в течение 7 дней с 28 сентября по 4 октября очевидца-

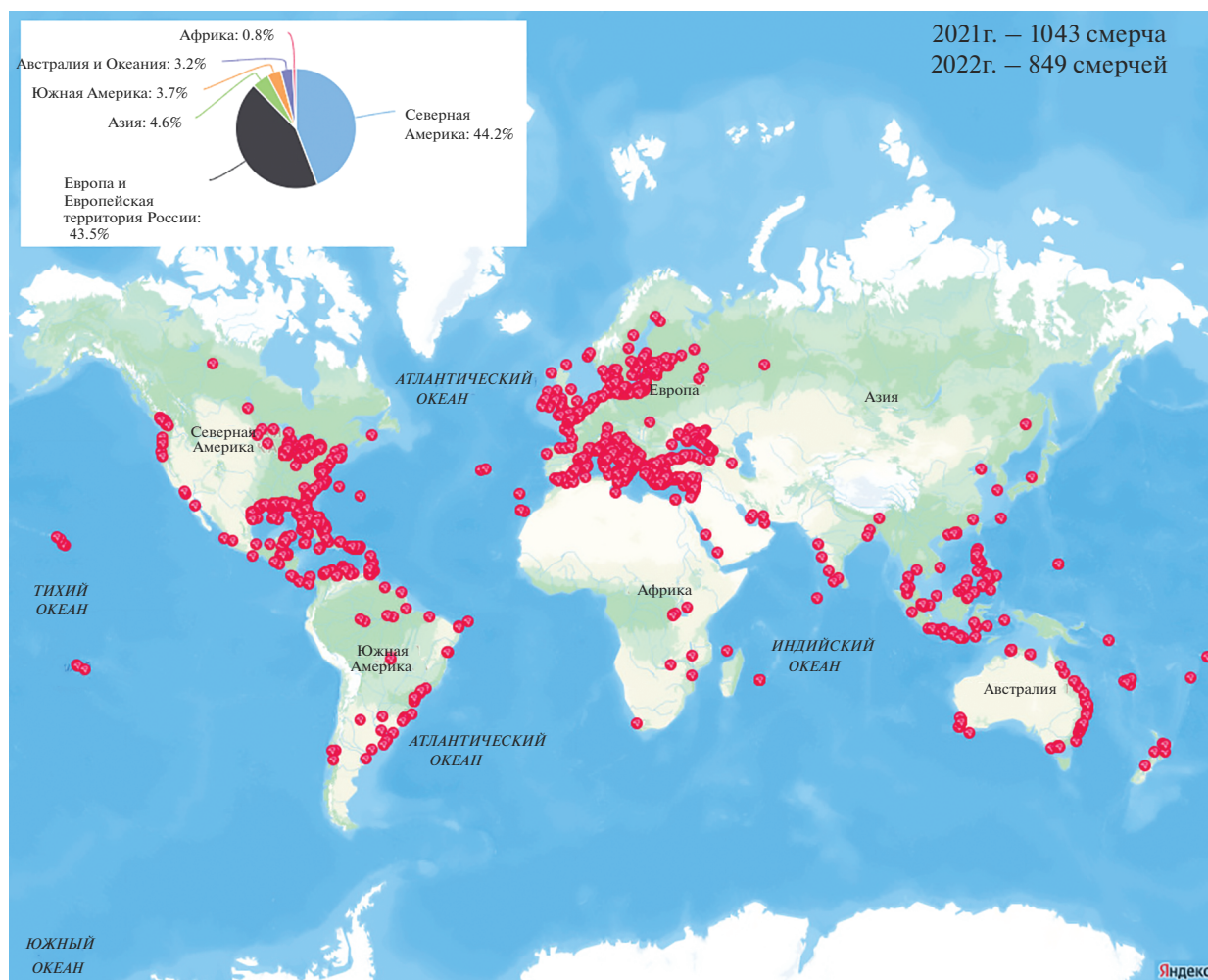


Рис. 3. Водяные смерчи на земном шаре в 2021–2022 гг. (по данным ICWR).

ми было зарегистрировано 232 воронки смерчей. Толчком к развитию этих событий послужило прохождение холодных воздушных масс над теплыми водами озер, что привело к резкому увеличению градиента температур и усилению конвекции [A week-long “waterspout outbreak” produced a record 232 funnels over the Great Lakes].

В дальнейшем была проведена работа по анализу динамики частоты регистрации водяных смерчей за период с 2000 по 2022 гг. в странах, расположенных в выделенных районах активного смерчеобразования – США и страны Южной Европы. Кроме того анализировались случаи возникновения водяных смерчей в России. Использовались открытые данные Европейской базы данных об опасных явлениях (European Severe Weather Database – ESWD, eswd.eu) и официальная статистика NOAA (Storm Events Database, www.ncdc.noaa.gov/stormevents). ESWD включает в себя данные очевидцев опасных явлений по различным странам Европы и России, в том числе

собранный российскими специалистами архив смерчей в странах бывшего СССР [Чернокульский и др., 2021]. При анализе учитывались случаи регистрации водяных смерчей, подтвержденные данными из надежных источников.

По результатам анализа для каждой страны были построены гистограммы распределения количества водяных смерчей по годам. На основании этих гистограмм были выбраны пять стран с достаточно протяженной береговой линией и с большим числом зарегистрированных случаев водяных смерчей за последние пять лет (с 2018 по 2022 гг.). Предполагается, что эти данные лучше всего отражают реальную картину событий. На рис. 6 представлены гистограммы для отобранных стран. Из рис. 6 видно, что из всех стран менее всего подвержена разбросу значений статистика по США, где водяные смерчи стали активно изучать еще со второй половины XX века. Много работ по исследованиям водяных смерчей вблизи северного побережья Мексиканского залива



Рис. 4. Основные районы образования водяных смерчей в Европе по данным ICWR за 2021–2022 гг. (в скобках указано количество смерчей).

и вдоль Флориды связано с именем американского ученого Джозефа Голдена (Joseph H. Golden) [Golden, 1970; Golden, 1971; Golden, 1974a; Golden, 1974b; Golden, 1977; Golden и Bluestein, 1994].

Представленная статистика свидетельствует о том, что из года в год в США с небольшой долей вариации регистрируется практически одно и то же количество водяных смерчей — около 200 случаев в год. Каких-либо существенных сдвигов в сторону уменьшения или увеличения со временем числа смерчей не отмечается. Следует подчеркнуть, что в данных ICWR содержится больше записей о водяных смерчах в США в 2021–2022 гг., чем в официальной статистике NOAA. Вероятнее всего, это связано с тем, что ICWR агрегирует данные всех очевидцев событий, в то время как в официальной статистике, по всей видимости, содержатся данные только от профессиональных наблюдателей (метеорологов). Кроме того в статистке NOAA за указанный период крайне мало данных о водяных смерчах над Великими американскими озерами. С учетом этого, цифру в 200 смерчей в

год, с большой долей вероятности, следует рассматривать лишь как нижний предел.

Данные по остальным четырем странам со временем показывают многократный рост числа регистрируемых водяных смерчей. Очевидно, что это обусловлено недостаточной полнотой имеющихся данных, особенно за первые 10 лет анализируемого периода. По этой причине при рассмотрении данной статистики предлагается ограничиться последними пятью годами. С учетом этого могут быть даны следующие оценки: в Италии, как и в США, ежегодно регистрируют более 200 случаев водяных смерчей, следом идет Греция — около 90 смерчей в год, далее Россия — около 70 смерчей в год и Турция — около 50 смерчей в год.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЯНЫХ СМЕРЧЕЙ

Как уже упоминалось выше, по мнению многих специалистов, водяные смерчи имеют схожие черты со смерчами на суше, но при этом менее интенсивны и более распространены на земном

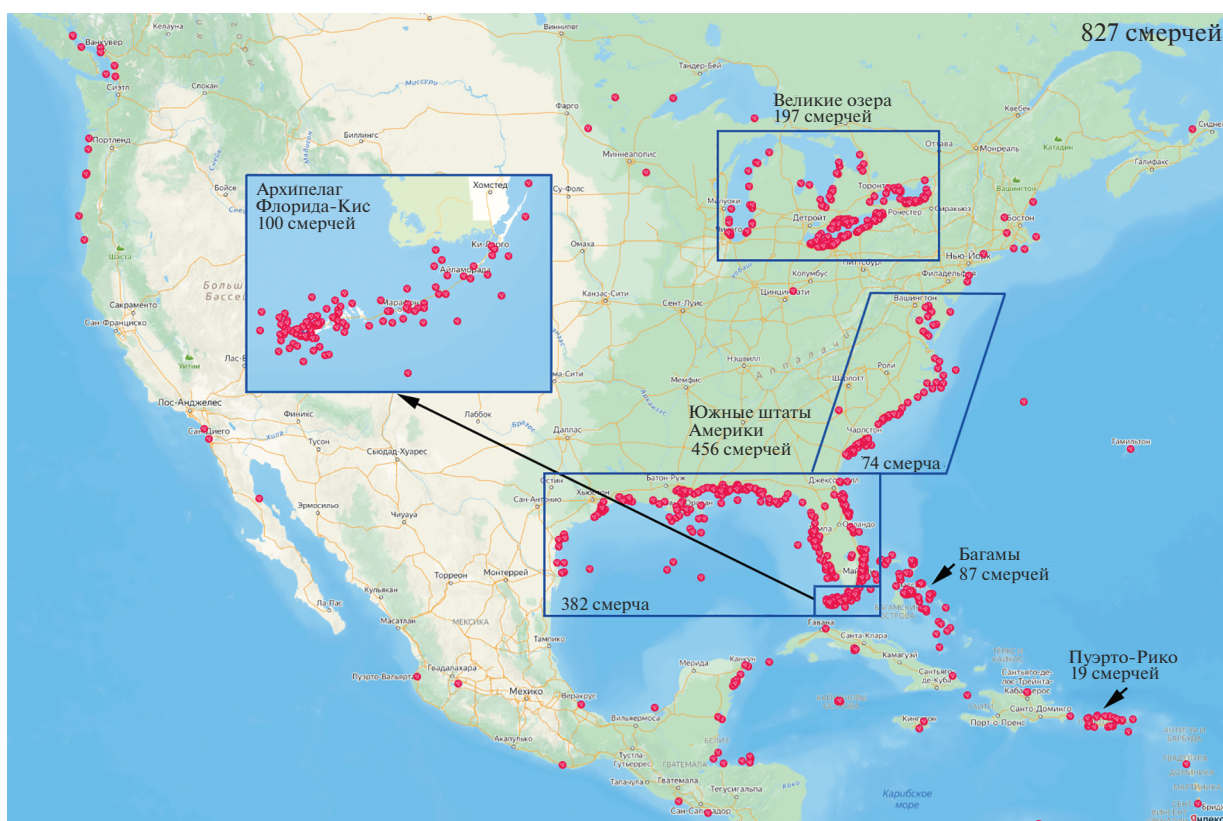


Рис. 5. Основные районы образования водяных смерчей в Северной Америке по данным ICWR за 2021–2022 гг.

шаре. По этим причинам со второй половины XX века стали проводиться активные исследования их характеристик. Организовывались целенаправленные экспедиции по изучению водяных смерчей [Golden, 1970; Golden and Bluestein, 1994; Simpson et al., 1986]. Целью этих исследований был сбор данных о водяных смерчах для лучшего понимания механизмов их образования и поддержания, для последующей возможности распространения полученных знаний на их более суровых собратьев на суше.

До 1960-х годов исследования водяных смерчей в основном ограничивались визуальными наблюдениями отдельных случаев их возникновения [Miglietta, 2019]. В конце 60-х–начале 70-х годов XX века водяные смерчи стали изучать, главным образом, посредством прямых измерений с бортов самолетов в непосредственной близости от видимой воронки вихря. Небольшие скорости ветра в водяных смерчах позволяли проводить подобные работы. В более мощных торнадо многие попытки размещения измерительного оборудования по пути следования смерчей часто заканчивались неудачей вследствие его поломки [Samaras, 2004].

Первые работы по использованию самолетов для изучения водяных смерчей в основном были связаны с их высотной фотосъемкой в отдельные дни

конвективного сезона [Rossow, 1970; Woodley et al., 1967]. С мая по сентябрь 1969 г. при активном участии Голдена проводилась экспедиция по изучению жизненного цикла водяных смерчей у берегов Флорида-Кис [Golden, 1970]. В ходе этих исследований с самолета производились выбросы дымовых шашек и по перемещению дымовых шлейфов собирались данные о структуре нижнего слоя в районах возникновения водяных смерчей. Кроме того выполнялась фото и видео съемка водяных смерчей камерой высокого разрешения. Голден, обобщив полученные данные, выделил пять стадий жизненного цикла водяных смерчей: темное пятно, спиральный шлейф, спиральное кольцо, стадия зрелости и стадия распада [Golden, 1974b]. Каждая из стадий имеет свою продолжительность, при этом не все смерчи могут проходить через все стадии.

По результатам работ Голдена были получены следующие количественные оценки. Суммарное время жизни водяного смерча от момента его зарождения до полного распада может варьироваться от 7 до 55 мин, диаметр вихря может составлять от 3 до 150 м, а скорость распространения конденсата в воронке от 3 до 8 м/с, скорость вертикальных движений в вихре может достигать до 9.4 м/с. С учетом допущения о циклострофиче-

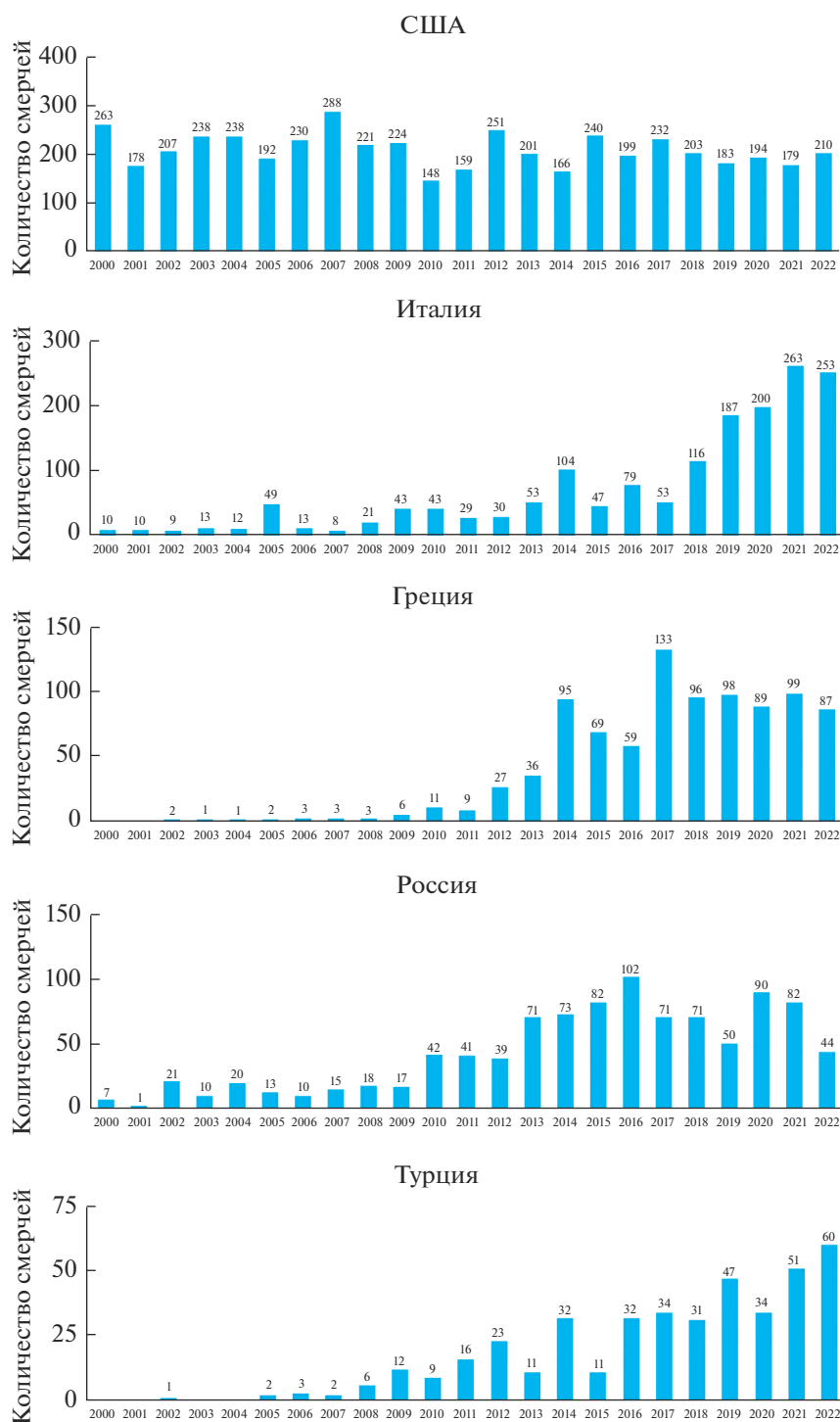


Рис. 6. Динамика количества зарегистрированных случаев водяных смерчей в различных странах по годам (по данным NOAA (США) и ESWD (остальные страны)).

ском балансе и о распределении ветра в смерче в соответствии с моделью вихря Рэнкина [Алексеев и др., 2003; Golden, 1971] падение давления в циклоническом вихре может достигать до 44 мб, а в антициклоническом до 64 мб. Максимальное значение скорости вращения в водяном смерче достига-

лось на его внешней границе. По фотометрическим оценкам максимум скорости для проанализированных случаев составил 27 м/с.

Еще одним важным результатом работ Голдена стало описание структуры вихря, которое впоследствии было верифицировано и несколько

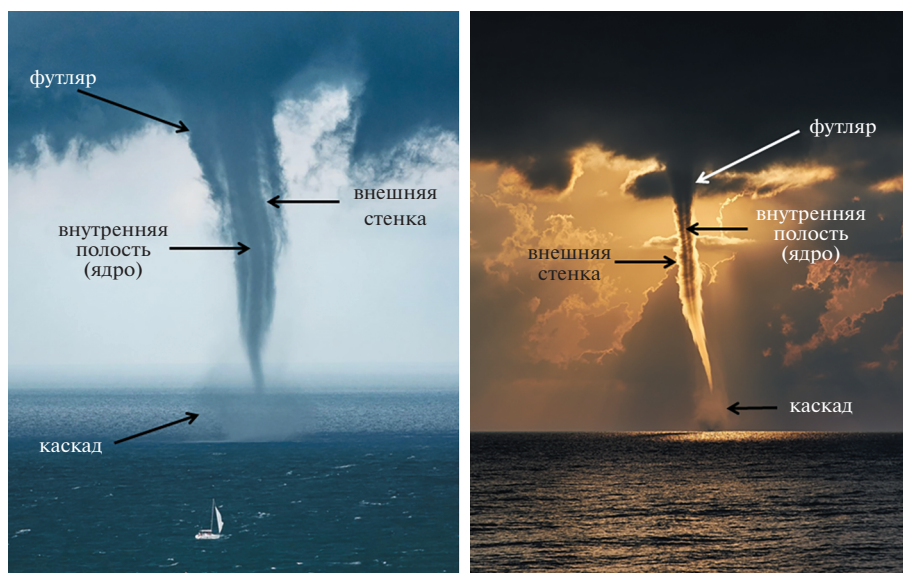


Рис. 7. Структура водяного смерча.

уточнено по данным лидарных измерений, о которых будет сказано ниже. Водяной смерч, как было установлено, в зрелой стадии своего развития состоит из полого ядра, окруженного внешней оболочкой (стенкой) с четкими границами, вокруг которой могут возникать дополнительные оболочки с более расплывчатыми границами (рис. 7). Внешняя оболочка, опоясывающая вихрь в его верхней части, свисающая из облака, получила название футляр, а оболочка в нижней части вихря — каскад. Кроме того анализ траектории дымового шлейфа показал, что в нижней части вихря отмечается хорошо выраженная асимметрия циркуляции воздуха.

В сентябре 1974 г. была осуществлена первая в истории серия успешных экспериментов по проникновению самолета с измерительным оборудованием в водяные смерчи в зрелой стадии у берегов Флорида-Кис [Leverson and Sinclair, 1977]. Во время нахождения в смерче производились измерения температуры воздуха, давления и скорости ветра. По результатам анализа полученных данных было установлено, что водяной смерч содержит область с более теплым ядром в центре (аномалия температуры до 0.3°C), по внешней границе ядра циркулирует восходящий поток с вертикальной скоростью от 5 до 10 м/с, что согласуется с ранее полученными оценками Голдена. Кроме того в ходе проведенных исследований было подтверждено сходство в распределении тангенциальной скорости ветра и в падении давления в водяных смерчах и в пыльных вихрях. При анализе данных использовалось уже упомянутое ранее допущение циклострогофического баланса в совокупности с моделью вихря Рэнкина для описания профиля скорости. Было установлено, что данная идеализация позволяет объяснить 75% падения давления в яд-

ре водяного смерча, которое, как было установлено, может варьироваться от 1 до 10 мб. Максимальная измеренная скорость вращения на границе ядра составила 28.1 м/с, при этом также была отмечена и ранее выявленная Голденом асимметрия циркуляции.

В период с 26 августа по 14 сентября 1976 г. у берегов Флорида-Кис проводились самолетные измерения с использованием доплеровского лидара, конструкция которого не предполагала необходимости прямого проникновения в водяной смерч [Schwiesow, 1981; Schwieson et al., 1981]. Лидар обеспечивал измерение горизонтальной компоненты тангенциальной скорости, измерения проводились на высотах от 695 м (вблизи основания облака) до 95 м над поверхностью воды. Дистанционный метод измерения исключал необходимость коррекции результатов, которая имела место в случае с прямыми измерениями. Горизонтальная компонента скорости рассматривалась как нижний предел тангенциальной скорости на заданном расстоянии. Наиболее существенные расхождения в значениях измеренной и реальной тангенциальной скорости отмечались в случае наклона оси вихря.

Максимальная измеренная скорость вращения в ходе проведенных лидарных измерений составила 29.6 м/с на высоте 460 м. Минимальный измеренный диаметр вихря составил 6.6 ± 1.5 м на высоте 160 м. По данным измерений было установлено, что водяные смерчи в основной своей массе имеют сложное строение и включают в себя цилиндрические концентрические оболочки, вращающиеся с различной угловой скоростью (рис. 8). Этот факт согласуется с результатами более ранних исследований Голдена.

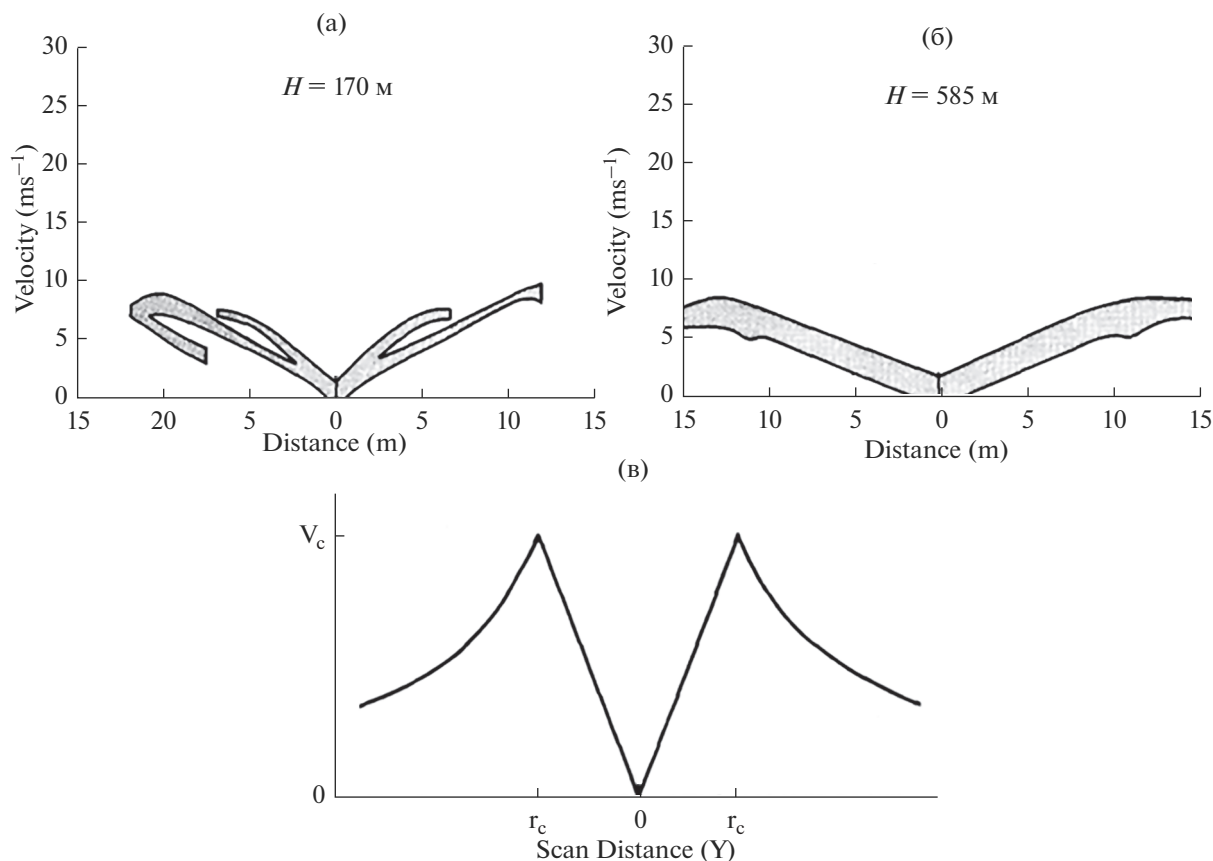


Рис. 8. Зависимость скорости от расстояния от центра вихря на разных высотах по данным лидарных измерений (а и б) (для разных вихрей) и по модели вихря Рэнкина (в) [Schwiesow, 1981].

На рис. 8 показаны примеры полученных профилей скорости ветра на двух высотах для различных вихрей (а и б) и для сравнения эталонный профиль скорости по модели вихря Рэнкина (в). Профили измеренной скорости описывают сложный объект, состоящий из двух и более вложенных друг в друга идеализированных профилей, при приближении к поверхности воды эта структура все более усложняется. Внутренняя оболочка водяного смерча характеризуется более высокими скоростями вращения по сравнению с внешними. По модели вихря Рэнкина в центре вихря тангенциальная скорость должна быть нулевой. Однако, как видно из рис. 8, скорость в центре постоянна и отлична от нуля.

График скоростей с наветренной стороны (слева на рис 8а) отличается от графика для подветренной стороны (справа на рис 8а), что является следствием взаимодействия вихря с окружающей средой. Смешивание с более медленно вращающимся воздухом уменьшает тангенциальную скорость и усиливает турбулентность. Асимметрия — есть результат притока воздуха к вихрю, который тормозит вращение с наветренной стороны. С высотой диаметр вихря увеличивается, у него появляются оболочки с большим диаметром

и в структуре скорости все более становится видна симметрия. Отмечается плавный переход скоростей от оболочки к оболочке. Таким образом, данные исследования еще раз подтвердили уже известные на тот момент выводы об асимметрии циркуляции и о сложной структуре вихря.

Начиная с 90-ых годов XX века, дальнейшие исследования водяных смерчей в основном были связаны с использованием доплеровских радиолокаторов [Miglietta, 2019]. Однако ввиду небольших горизонтальных размеров вихря не всегда на радиолокационном изображении можно было выявить так называемый “куплет” скорости — область с различными по знаку значениями радиальной скорости, идентифицирующую наличие вращения. По этой причине в подобных исследованиях основной упор, как правило, делался на анализе окружения, в котором возникал вихрь, при этом подчеркивалась важная роль сдвига ветра для образования водяного смерча.

ВОДЯНЫЕ СМЕРЧИ В РОССИИ

На рис. 9 показана карта мест регистрации водяных смерчей в России по данным ESWD за период с 2000 по 2022 гг. Как видно из рис. 9, основная масса

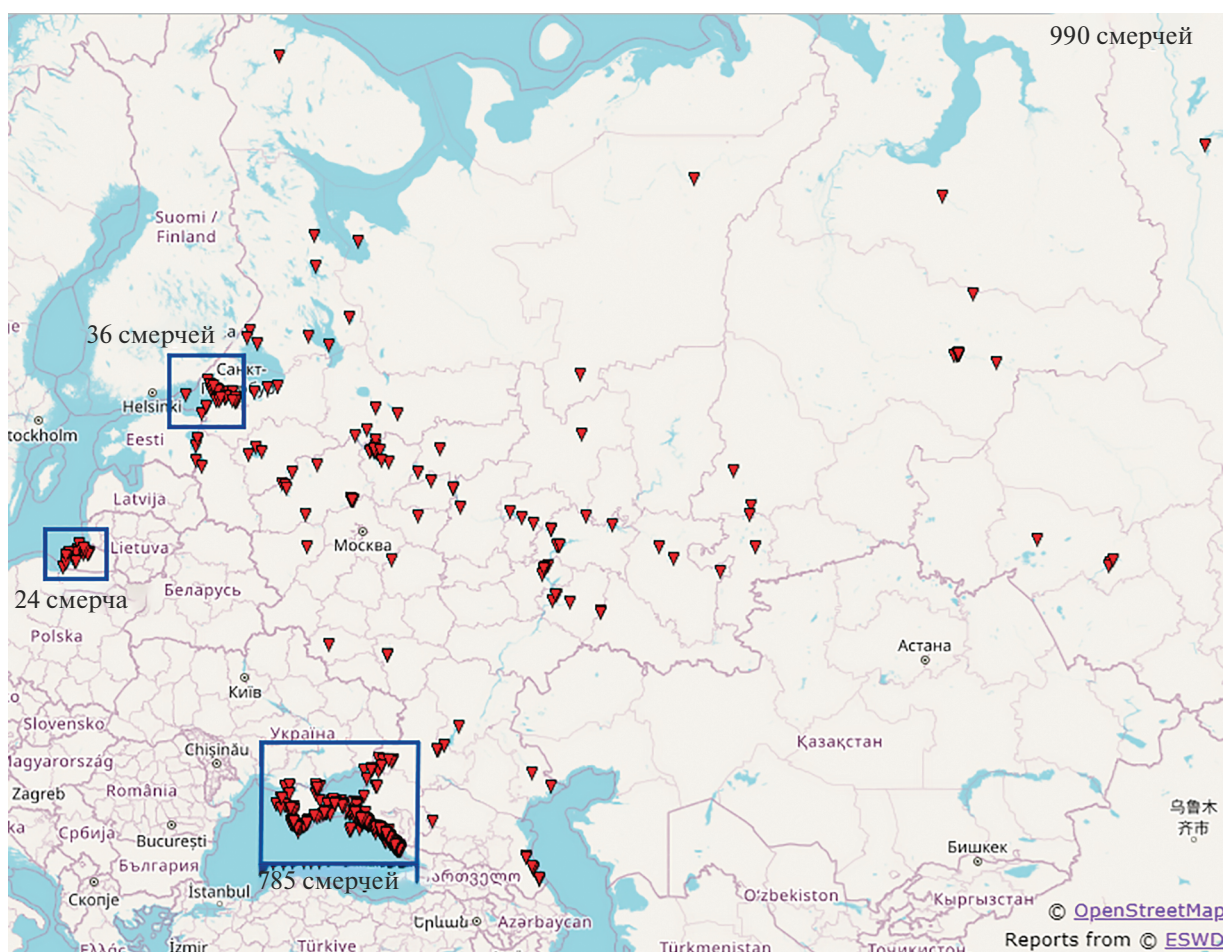


Рис. 9. Водяные смерчи в России по данным ESWD за 2000–2022 гг.

смерчей приходится на побережье Краснодарского края и Крыма. Нередко смерчи регистрируют и в Финском заливе [Попов и др., 2020], а также вдоль побережья Калининградской области (рис. 10). Единичные случаи появления водяных смерчей в России могут отмечаться у западного побережья Каспийского моря, над озерами (Чудское, Ладожское [Синькевич и др., 2020], Онежское, Ильмень), водохранилищами (Цимлянское, Куйбышевское, Сургутское, Новосибирское, Рыбинское, Горьковское, Ивановское) и реками (Волга, Обь). Известны случаи образования водяных смерчей и в Приморском крае [Павлов и Замышляев, 2003], а также над озером Байкал [Смерч пронесся по берегу озера Байкал]. Следует подчеркнуть, что в архиве ICWR, очевидно, представлены не все данные по России за 2021–2022 гг. и наиболее полными за этот период следует считать данные ESWD.

На рис. 11 представлены статистические данные о водяных смерчах у Черноморского побережья России, собранные автором по результатам многолетних исследований, посвященных разработке методики их прогноза [Калмыкова, 2021а].

Несмотря на целенаправленный учет случаев регистрации черноморских смерчей в России, данную статистику можно рассматривать лишь как некоторую минимальную оценку реального числа смерчей, возникающих в данном регионе. Неполнота имеющихся данных особенно видна в течение первых трех лет рассматриваемого периода.

С учетом ранее выбранной стратегии (учет данных за последние 5 лет) могут быть даны следующие оценки: ежегодно у Черноморского побережья России возникают около 50 смерчей, смерчи наблюдают в среднем 30 дней в году. Чаше всего черноморские смерчи возникают с июля по сентябрь, на этот же период приходится и пик температуры воды в Черном море (рис. 12). Известны редкие случаи возникновения черноморских смерчей и в более холодные месяцы года. Больше всего смерчей регистрируют у берегов Сочи и Туапсе (более 7 смерчей в год), но нужно принять во внимание и высокую плотность населения в этих районах [Калмыкова, 2021б]. В Крыму, как правило, отмечают не более 10 смерчей в год.



Рис. 10. Водяные смерчи в российских регионах [фото из открытых источников: vk.com].

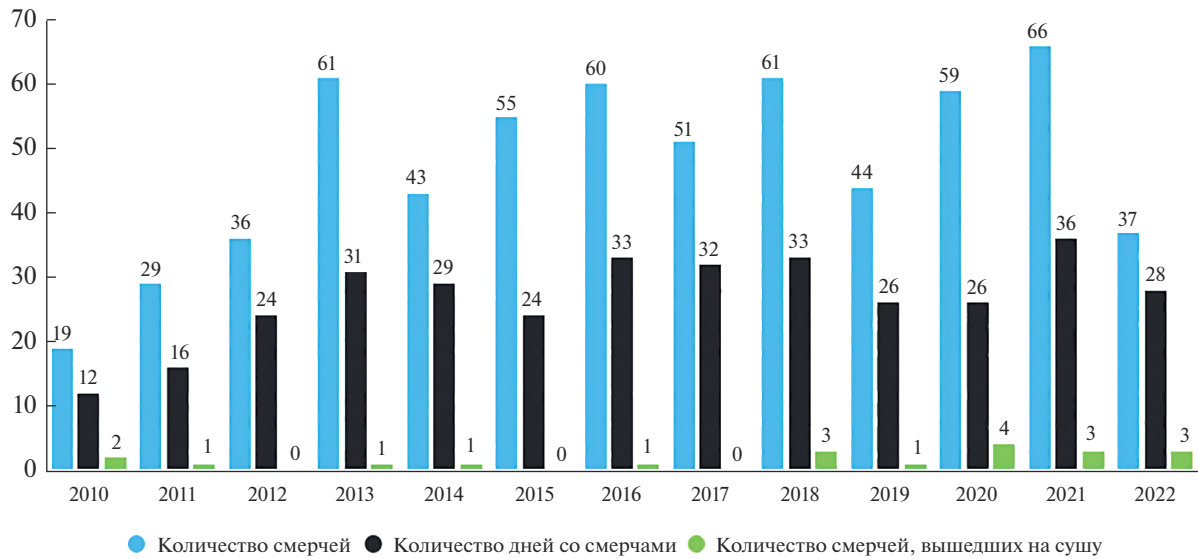


Рис. 11. Водяные смерчи у Черноморского побережья России по данным собранного автором архива случаев их регистрации с 2010 по 2022 гг.

До четырех смерчей в год могут выходить на побережье Краснодарского края. К счастью, эти выходы, как правило, не приносят существенного ущерба и ограничиваются повреждением пляжного инвентаря и конструкций прибрежных построек (кафе, гостиниц и др.). Из истории известны единичные случаи, когда выходы черноморских смерчей привели к настоящим катастрофам с челове-

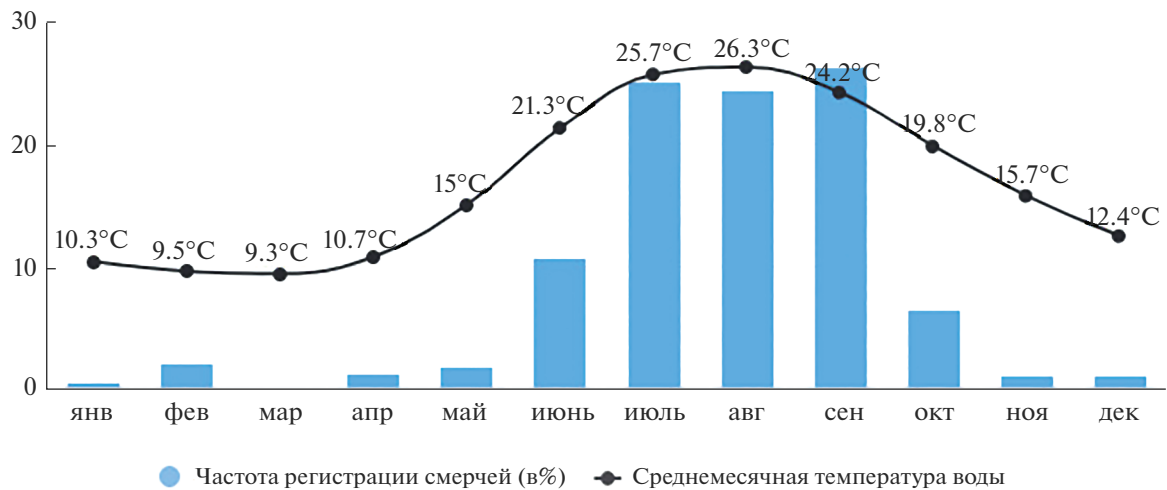


Рис. 12. Годовой ход водяных смерчей у Черноморского побережья России и температуры воды в Черном море.

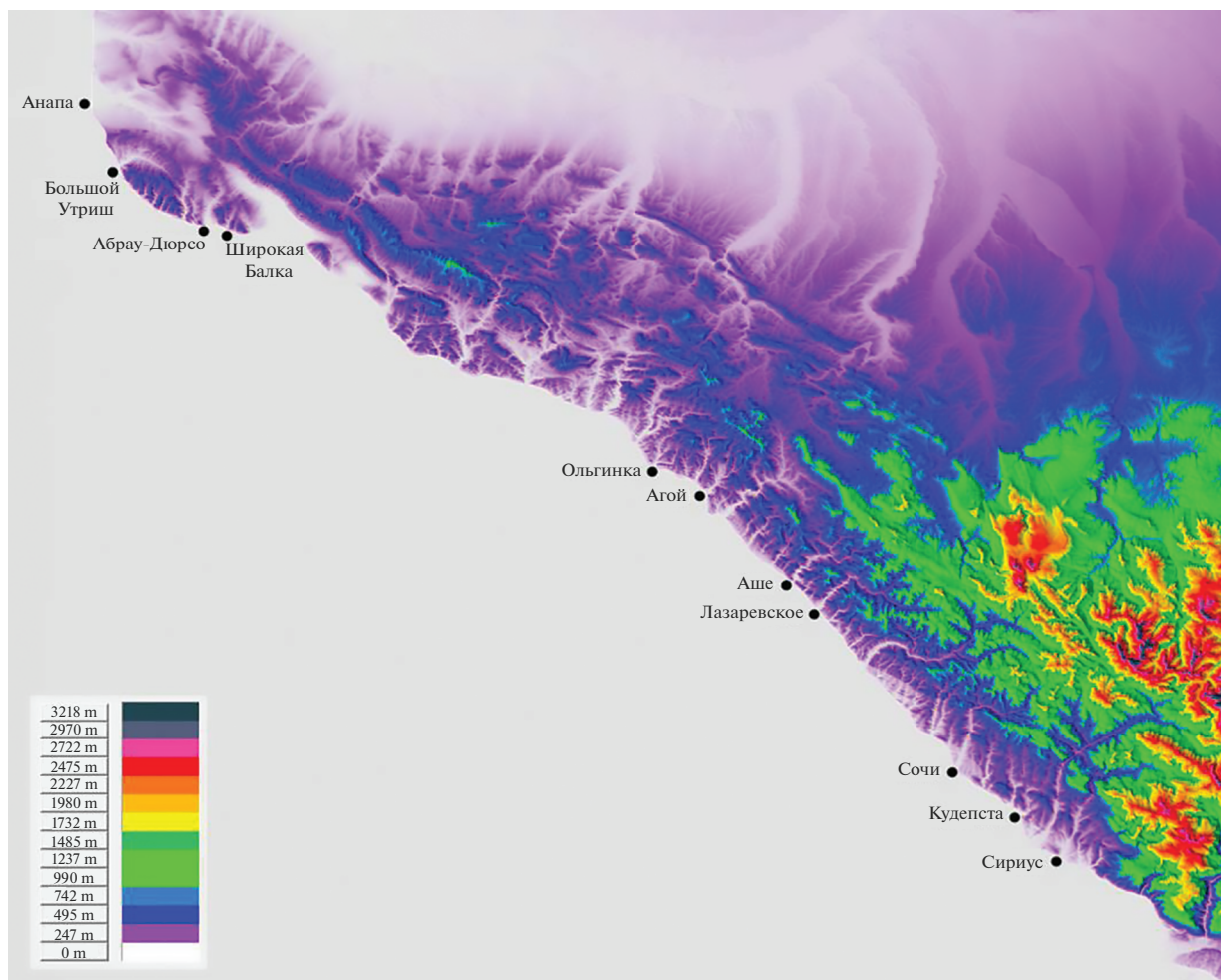


Рис. 13. Карта рельефа Черноморского побережья с названиями населенных пунктов, вблизи которых с 2010 по 2022 гг. регистрировались случаи выхода водяных смерчей на сушу.

ческим жертвами [Ткаченко и др., 2019; Шнюков и др., 1994]. Места выхода смерчей на сушу достаточно хорошо согласуются с расположением речных долин (рис. 13). Очевидно, что смерчи выходят на сушу там, где нет препятствий для свободного продвижения воздушных потоков вглубь побережья. Сложная система рельефа Краснодарского края с многочисленными речными долинами и ущельями обуславливает возможность выхода смерчей на сушу практически вдоль всего рассматриваемого побережья.

На российскую северо-восточную часть Черного моря приходится основная масса регистрируемых в этой районе водяных смерчей. К причинам такого активного смерчеобразования в этой части моря можно, в первую очередь, отнести наличие системы достаточно высоких Кавказских гор и высокий температурный режим поверхностных вод. Горы способствуют завихренности воздушных потоков, а теплое море активному развитию конвекции, особенно при вторжениях на Кавказ холодных воздушных масс и при прохождении через Черное море крупномасштабных синоптических образований из Атлантики и Средиземного моря [Нестеров, 2018; Снитковский, 1987].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы подготовлен обзор изученности водяных смерчей в мире.

Водяные смерчи могут быть отнесены к классу конвективных вихрей с теплым ядром и пониженным давлением в центре вихря, наряду с пыльными вихрями, торнадо и ураганами. Образованию “классических” немезоциклонных водяных смерчей способствует концентрация вертикальной завихренности в приводном слое, обуславливаемая действием источников локального масштаба, мощная конвекция для формирования столба вихря, а также высокая влажность и небольшой вертикальный сдвиг ветра в нижнем слое атмосферы для поддержания вихря. Наиболее интенсивные водяные смерчи возникают из суперячеек, которые образуются в условиях сильной неустойчивости и высокой влажности воздуха, при наличии струйного течения нижнего уровня и больших вертикальных сдвигов ветра.

Чаще всего водяные смерчи регистрируют в прибрежных водах Средиземного моря, вдоль побережья Южных штатов Америки и над Великими американскими озерами. При этом наибольшая плотность водяных смерчей на нашей планете приходится на архипелаг Флорида-Кис (от 50 до 500 смерчей ежегодно). В Италии и США ежегодно возникают более 200 водяных смерчей, в Греции — около 90 смерчей, в России — около 70 смерчей, в Турции — около 50 смерчей.

Водяные смерчи имеют сложную структуру. Вокруг ядра вихря вращаются вложенные цилиндрические оболочки. В нижней части вихря прослеживается асимметрия вращения, связанная с взаимодействием с более медленно движущимся воздухом с наветренной стороны. В водяном смерче приблизительно выполняется условие циклострофического баланса, а распределение скорости ветра более всего согласуется с моделью вихря Рэнкина. Полученная по данным лидарных измерений максимальная скорость вращения в водяном смерче составила 29.6 м/с.

В России водяные смерчи чаще всего возникают у Черноморского побережья — около 50 случаев в год. До четырех смерчей в год могут выходить на сушу, как правило, в районах речных долин и ущелий Краснодарского края. Высокие горы и теплое море способствуют активному смерчеобразованию в северо-восточной части Черного моря.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (№ 22-27-00039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 503 с.
- Калмыкова О.В. Методика оценки смерчопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний // Информационный сборник “Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов”. 2021. № 48. С. 42–61.
- Калмыкова О.В. Смерчи над Черным морем — новая визитная карточка юга России // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов (“Опасные явления — III”). 15–19 июня 2021 г. Материалы международной научной конференции. Ростов-на-Дону, 2021. С. 73–77.
- Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны над морями европейской части России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 1(367). С. 97–115.
- Павлов Н.И., Замышляев С.В. Смерчи Приморского края и их возможная интенсификация в период глобального антропогенного потепления климата // Труды Дальневосточного государственного технического университета. 2003. № 133. С. 145–151.
- Попов В.Б., Синкевич А.А., Янг Дж., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. 2020. № 9. С. 5–16.
- Синкевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером

- по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 153–158.
- Смерч пронесся по берегу озера Байкал* — https://www.ltv.ru/news/2021-01-06/399568-smersch-pronessya_po_beregu_ozera_baykal
- Снитковский А.И.* Смерчи на территории СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.
- Ткаченко Ю.Ю., Денисов В.И., Перов Е.А.* Морские водяные смерчи на Черноморском побережье Краснодарского края, наблюдение, прогнозирование // Экология, экономика, информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2019. № 4. С. 164–170.
- Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Кюне Т.* Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 17–34.
- Шнюков Е.Ф., Митин Л.И., Цемко В.П.* Катастрофы в Черном море. Киев: Манускрипт, 1994. 296 с.
- A week-long 'waterspout outbreak' produced a record 232 funnels over the Great Lakes* — <https://www.washingtonpost.com/weather/2020/10/06/great-lakes-waterspout-outbreak/>.
- Brady R.H., Szoke E.J.* A Case Study of Nonmesocyclone Tornado Development in Northeast Colorado: Similarities to Waterspout Formation // Monthly Weather Review. 1989. V. 117. P. 843–856.
- Chan P.W., Hon K.K., Robinson P., Kosiba K., Wurman J., Li Q.S.* Analysis and numerical simulation of a supercell tornado at the Hong Kong adjacent waters // Meteorological Applications. 2022. V. 29. 17 p.
- Dotzek N., Emeis S., Lefebvre C., Gerpott J.* Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting // Meteorologische Zeitschrift. 2010. V. 19. № 1. P. 115–129.
- Glanville M.J., Rohr C.J., Holmes J.D.* Tornadoic Waterspout Impacts on Coastal Australia // 18th Australasian Wind Engineering Society Workshop: preprints. McLaren Vale (South Australia). 2016. 4 p.
- Golden J.H.* An Assessment of Waterspout Frequencies along the U. S. East and Gulf Coasts // Journal of Applied Meteorology. 1977. V. 16. P. 231–236.
- Golden J.H.* Scale-Interaction Implication for the Waterspout Life Cycle. II // J. Applied Meteorology. 1974. V. 13. № 6. P. 693–709.
- Golden, J.H.* The Life Cycle of Florida Keys Waterspouts. I // J. Applied Meteorology. 1974. V. 13. № 6. P. 676–692.
- Golden J.H.* The Lower Florida Keys Waterspout Project, May–September 1969 // Bulletin American Meteorological Society. 1970. V. 51. № 3. P. 235–236.
- Golden J.H.* Waterspouts / Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Editor-in-Chief J.R. Holton, second edition, volume 3. N.Y.: Academic Press, 2015. P. 369–383.
- Golden J.H.* Waterspouts and Tornadoes over South Florida // Monthly Weather Review. 1971. V. 99. № 2. P. 146–154.
- Golden J.H., Bluestein H.B.* The NOAA–National Geographic Society Waterspout Expedition (1993) // Bulletin American Meteorological Society. 1994. V. 75. № 12. P. 2281–2288.
- Leverson V.H., Sinclair P.C.* Waterspout Wind, Temperature and Pressure Structure Deduced from Aircraft Measurements // Monthly Weather Review. 1977. V. 105. P. 725–733.
- Markowski P.M., Richardson Y.P.* Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. New Jersey: Wiley, 2010. 407 p.
- Meaden G.T.* The Classification of Whirlwind Types and a Discussion of Their Physical Origins // Proceedings of the First Conference on Tornadoes, Waterspouts, Wind-Devils and Severe Storm Phenomena. The J. Meteorology. Oxford Polytechnic. 29th June 1985. P. 194–202.
- Miglietta M.M.* Waterspouts: A Review // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2019. 15 p.
- Miglietta M.M., Matsangouras I.* An updated “climatology” of tornadoes and waterspouts in Italy // International J. Climatology. 2018. V. 38. P. 3667–3683.
- Mihajlovic J., Buric D., Ducic V., Milenkovic M.* Synoptic characteristics of an Extreme Weather Event: The Tornadoic Waterspout in Tivat (Montenegro), on June 9, 2018 // Geographia Polonica. 2021. V. 94. P. 69–90.
- Renko T., Kuzmic J., Soljan V., Mahovic N.S.* Waterspouts in the Eastern Adriatic from 2001 to 2013 // Natural Hazards. 2016. V. 82. P. 441–470.
- Renno N.O., Bluestein H.B.* A Simple Theory for Waterspouts // American Meteorological Society. 2001. V. 58. P. 927–932.
- Rossow V.J.* Observations of waterspouts and their parent cloud // NASA Technical Note. 1970. 63 p.
- Samaras T.M.* A historical perspective of In-Situ observations within Tornado Cores // 22nd Conference on Severe Local Storms: preprints. Hyannis (Massachusetts, USA). 2004. 11 p.
- Schwiesow R.L.* Horizontal Velocity Structure in Waterspouts // J. Applied Meteorology. 1981. V. 20. P. 349–360.
- Schwiesow R.L., Cupp R.E., Sinclair P.C., Abbey R.F.* Waterspout Velocity Measurements by Airborne Doppler Lidar // J. Applied Meteorology. 1981. V. 20. P. 341–348.
- Simpson J., Morton B.R., McCumber M.C., Penc R.S.* Observations and Mechanisms of GATE Waterspouts // American Meteorological Society. 1986. V. 43. № 8. P. 753–782.
- Sioutas M., Szilagyi W., Keul A.* The International Centre for Waterspout Research // 5th European Conference on Severe Storms: preprints. Landshut (Germany). 2009. 2 p.
- Smith B.B.* Waterspouts — <https://www.weather.gov/apx/waterspout>.
- Spratt S.M.* Employing the WSR-88D for Waterspout Forecasting / NOAA Technical Report. 1994. 10 p.
- Types of tornado* — <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/tornadoes/types/>.
- Wakimoto R.M., Wilson J.M.* Non-supercell Tornado // Monthly Weather Review. 1989. V. 117. № 6. P. 1113–1140.
- Woodley W.L., Golden J.H., Halter B.C.* Aircraft Observations in the Immediate Vicinity of Two Waterspouts // Monthly Weather Review. 1967. V. 95. № 11. P. 799–803.

Waterspouts in Russia and Over the World: Climatology and Conditions of Formation

O. V. Kalmykova*

FSBI "Research and Production Association "Typhoon", 4 Pobedy st., Obninsk, 249038 Russia

**e-mail: kov@feerc.ru*

The overview of studies of waterspouts over the world is presented. The most well-known schematic models of the waterspouts formation are given. The main factors of waterspouts genesis above the water surface are identified. Open access data about waterspouts formed on the Earth from 2000 to 2022 are collected and analyzed. Three main areas of waterspouts formation are highlighted as the following: Mediterranean Sea, Gulf of Mexico and adjacent Atlantic, Great Lakes. The frequency of occurrence of waterspouts in countries with the largest number of cases of their annual registration (USA, Italy, Greece, Russia, Turkey) has been estimated. Well known data about waterspouts characteristics derived from direct and remote measurements are summarized. A conceptual scheme of their structure is described. Waterspouts in Russia are analyzed. Statistics about cases of their registration off the Russian Black Sea coast are given. Map with places of Black Sea waterspouts landfalls is created.

Keywords: waterspouts, waterspouts genesis features, waterspouts structure, waterspouts characteristics, areas of active waterspouts genesis, waterspouts over the Black Sea, statistics